地球化学 45, 199-212 (2011) Chikyukagaku (Geochemistry) 45, 199-212 (2011)

総説

# 天体観測で探る惑星形成の初期条件

## 深川美里\*

(2011年9月14日受付, 2011年11月14日受理)

## Toward understanding the formation of planets: Observations of planet nurseries

Misato Fukagawa\*

\* Department of Earth and Space Science, Osaka University 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Characterizing extra-solar planetary systems is one of the most important research topics in contemporary astronomy. Today, more than 550 planets are known to exist, many of which show quite different characteristics from the Solar system planets in their masses, orbits, and densities. The situation makes us to recognize that it is central to construct the generic model on planet formation and evolution to reproduce the variety of exoplanets, and to place our Solar system in the context of other planetary systems. The key ingredients for the model are physical and chemical properties of protoplanetary disks, rotating structures around young stars where planets form. Although we are still far from being able to understand them, the astronomical observations have provided fundamental knowledge about such as masses, lifetimes, and structural evolution of disks. State-of-the-art instruments allow to directly explore close neighborhoods of the central stars, revealing rich diversity in their structures and signs of planets embedded in disks. In this paper, recent observational efforts of young circumstellar disks are reviewed focusing on infrared photometric and imaging studies.

Key words: Astronomy, Planet formation, Extra-solar planetary systems, Protoplanetary disks, Infrared, Observations

## 1. はじめに

太陽系外惑星は現在までに550個以上発見されてお り、ケプラー衛星が検出している候補天体も含めれ ば、その数は軽く1000を超える(Borucki *et al.*, 2011)。系外惑星系そのものの存在はもはや普遍的な ものとして確立しつつあり、あとは観測的制約を克服 しながら天体力学的および物質化学的性質の全体像を 得、その中に太陽系を位置づける作業にまい進するの みである。この総説では、まずこれら系外惑星検出の 成果を垣間見た上で、惑星の「形成」過程を知るとい う目的を念頭に置きながら、若い星の観測結果を紹介 したい。形成を再現してみせようとするなら,まずは 材料物質を用意し,適切な形成メカニズムを入れて, 惑星系を作ることになろう。この材料の物理状態(初 期条件)と完成した惑星系の性質,その両方が,観測 によって確認されるべきものである。できあがった惑 星系については,前述のように検出例が急増してお り,惑星形成理論との比較が精力的に行われている。 では材料の方はどうか。こちらも惑星形成の母胎であ る原始惑星系円盤の観測は盛んだ。もっとも基本的な 情報である密度・温度の空間的分布についてすら,観 測的に直接確かめることはまだまだ難しいが,それで も観測装置性能の向上に伴い,実在する円盤の状況が 徐々に見え始めている。そこで円盤の構造と進化に関 する赤外線観測に重点を置きながら,何がどこまで見 えてきているのかを述べていく。なお,系外惑星分野

<sup>\*</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1

の主な方向性を強いて大別するならば、一つは検出の 努力を継続し惑星系アーキテクチャの全貌を明らかに すること、もう一つは惑星大気の理解であろう。惑星 大気の研究はそれこそアストロバイオロジーに深く関 連するのだが、これについては筆者の専門を遠く離れ るので、Seager and Deming (2010) などを参照さ れたい。

## 2. 系外惑星

#### **2.1** 様々な検出方法

惑星を見つけるには、惑星の存在が親星に与える影 響を頼りにする方法と、惑星そのものからのシグナル をとらえる方法がある。発見数を稼いできたのはもっ はら前者であり、中でも視線速度(ドップラー偏移) 法とトランジット法がその代表格である。視線速度法 では、惑星という別の重力源が存在する場合に親星の 位置がわずかにふらつくことを利用し、親星が観測者 に対して近づいたり遠ざかったりする現象を、星から の光の波長変化(ドップラー偏移)として測定する (Sato et al., 2005; Lovis and Fischer, 2010)。当然 ながら、重く、中心星に近い惑星の方が親星に影響を 及ぼしやすいため、検出されやすい。一方、トラン ジット法は、観測者に対して惑星が親星の前面を通過 し、その一部を隠すときに星が暗くなる現象をとらえ る (Winn, 2010)。そのため、いかに精密に星の光量 を測定できるかによって、どのくらい小さい惑星まで 検出できるかが決まる。2009年に打ち上げられたケ プラー衛星は高精度測光に特化し、実際、約4ヶ月間 の観測結果から抽出された惑星候補の多くは、地球と 同程度の大きさの惑星であった(Borucki et al., 2011)。すなわち惑星の数は小さいほど多いという示 唆が得られ, また, 一つの惑星系は複数の惑星から成 る場合が多いといった傾向も見えてきている

(Latham et al., 2011)。トランジット法の利点は, 比較的容易な検出方法で惑星の大きさが分かるという だけではない。惑星は自身の温度に対応した赤外線を 放射しているので,親星の背後に隠れるとシステム全 体からの赤外線量が減少する。また,惑星が星の前面 を通過する際には,背景の星からの光が前面の惑星大 気によって吸収を受けるため,惑星大気の情報が観測 者に届く。すなわち,様々なタイミングのトランジッ トを複数の波長で観測することにより,惑星の温度や 大気組成の研究が可能になっている(Swain et al., 2008)。さらには,トランジット時間の変動から別の 惑星の存在を探るトランジット・タイミング変化法や (Holman *et al.*, 2010),トランジット中の親星から の光の速度(波長)変動を精密に測定し,惑星軌道と 星の自転軸との非整列を探る Rossiter-McLaughlin 効果の測定も盛んに行われている(Narita *et al.*, 2009)。

ただし、視線速度法にしてもトランジット法にして も、例えば太陽から1 AU(=1.5×10<sup>11</sup>メートル)の 距離にある地球は公転に1年かかるため、星から離れ た惑星を検出するのに必要な観測期間は、人間にとっ ては非常に長いものとなる。これに対し、星から比較 的離れた1~10 AU付近に感度があるのが、重力マイ クロレンズ法である (Gaudi, 2010; Sumi et al., 2010)。これは光が重力によって曲げられる性質を利 用している。ある光源の前を別の重力源が通り過ぎる と,重力源というレンズによって光が曲げられ,集光 されて観測者に届き、光源が明るくなったように見え る。このとき、レンズ天体に惑星が付随している場合 とそうでない場合とで, 増光の時間変化のパターンに 差が生じる。マイクロレンズ法は、ケプラー衛星によ る検出が難しい、中心星から遠い場所で地球型惑星探 しを行う手段として、次期探査計画の中心となること が予想されており、期待を集めている(Blandford et *al.*, 2010).

#### 2.2 太陽系形成から汎惑星系形成へ

このように様々な検出方法によって特徴的な惑星の 存在が明らかになりつつある。そしてまず顕になった のが,質量や軌道離心率などの点で,太陽系内惑星と は大きく異なる性質を持つ惑星が実際に存在するとい う事実である(Fig. 1)。太陽系における水星よりずっ と内側を周回する巨大ガス惑星ホット・ジュピター や,極端な楕円軌道を描く,あるいは星の自転と逆向 きに公転する惑星などは良い例だろう。それらの観測 事実は,太陽系形成論というよりもむしろ汎用の系外 惑星系形成論の構築へと研究者らを促し,現在,観測 結果の惑星分布を再現する理論計算から,本質となる 惑星形成過程を見出す試みが続いている(e.g., Ida and Lin, 2004)。

計算には当然初期条件が必要であり,多くの理論論 文で基本として用いられるのが,原始太陽系円盤の最 小質量モデル(minimum-mass solar nebula)であ る。後で述べるように惑星は若い星の周囲の円盤内で 形成されると考えられているが,このモデルは文字通 り,現在の太陽系を作るのに必要最低限の物質量を含



Fig. 1 Exoplanets discovered until April 2011 with various detection techniques such as radial velocity and transit measurements. The data were taken from Extrasolar Planet Encyclopedia (http://exoplanet.eu).

んだ円盤ということになる。太陽系惑星の金属(ヘリ ウムより重い元素)量を推定して固体物質を現在の惑 星位置に分布させ、太陽と同じ元素組成になるようガ ス成分を加えたものであり,重さは太陽のおよそ 1%,面密度は半径のマイナス1.5乗となっている (Weidenschilling, 1977; Hayashi, 1981)。また,温 度分布に関しては,円盤が星の光に対してほぼ透明 (光学的に薄い),つまり円盤内のほぼ全ての物質に 中心星からの光が当たることで円盤があたたまってい るような場合は比較的明瞭にべき乗で仮定できるが (Hayashi, 1981),円盤全体が若く密度が高いため 星の光に対して不透明である場合(光学的に厚い)に は、単純でない。簡単のためにべき乗仮定を置く、あ るいは円盤モデルから温度分布の計算を行うといっ たプロセスが入ることが多いが (Chiang and Goldreich, 1997; D'Alessio et al., 1998; Nomura, 2002),実際の状況をどれほど良く反映しているか は、観測が不足しているのでよく分からない、という のが実状だろう。つまり, 汎惑星形成論の初期条件 が、原始太陽系星雲モデルから脱却しきれていない、 脱却する必要があるかどうかの観測的証拠もまだ弱い のである。円盤自体が散逸してしまった後に、複数の 惑星間にカオス的な重力相互作用が働く可能性もある ため、初期条件と最終的な惑星系の構成は必ずしも1 対1であるとは限らないが、円盤の密度分布などが惑 星の質量や軌道分布に影響を及ぼし得ることは容易に



Fig. 2 Schematic illustration of the structural evolution of circumstellar material around a young Sun-like star. (a) A star is formed by self-gravitational collapse of a molecular cloud core. (b) A protostar and a disk are embedded in a surrounding material (envelope). The envelope feeds the central star through the disk. (c) A young star gets optically visible. The protoplanetary disk itself is also readily observable since the envelope is dispersed. (d) The disk becomes transparent as small dust grains are dissipated. (e) A young main-sequence star has a planetary system and a disk of leftovers (a debris disk).

想像できる(Mordasini et al., 2009; Kokubo and Ida, 2002)。また,近年の系外惑星探査においては,ハビ タブルゾーン(水が液体として存在できる温度領域) にある惑星を見つけやすいという理由から,太陽の半 分以下の重さしかない軽い星も,惑星探査の対象とし て注目されている(Kaltenegger et al., 2011)。これ らの結果の解釈には,星の重さによって原始惑星系円 盤の構造や寿命がどのように異なるかという情報も必 要である。すなわち,より現実的な初期条件とその多 様性を観測から得ることが,重要な課題の一つとなっ ている。

### 3. 若い星の星周環境

若い星をとりまく円盤は,星形成の過程で必然的に 生じる構造である。星誕生に伴い周囲の物質がどのよ うに進化するかについては,おおまかな描像はすでに ある(Fig. 2)。星は濃いガス雲(分子雲)中の高密 度領域が重力収縮して誕生する。このとき分子雲がも ともと持っている角運動量のため,周囲の物質(エン ベロープ)は直接星に降り積もることができず,星の 周りに回転円盤を形成する (e.g., Terebey et al., 1984)。円盤はケプラー回転しており、内側ほど回転 が速い。ただし円盤の大部分の物質は粘性による摩擦 のため星へ落下し、他のいくらかはそれらが失った角 運動量をもらって外側へ広がる(e.g., Hartmann, 2009; Lynden-Bell and Pringle, 1974)。星の年齢が1 ~10万年程度では星も円盤もエンベロープに深く埋 もれているが、年齢が100万年程度になるとエンベ ロープがほとんど散逸し, 星本体が可視光で見えるよ うになる(星の質量に応じてTタウリ型星, Herbig Ae 型星などと呼ばれる)。円盤もまた観測しやすい時 期であり、この後の節で紹介する観測結果のほとんど はこの時期の円盤を対象にしている。進化が進み1000 万年程度になると円盤物質はほとんど消失してしまう ため、この頃には惑星系がすでに出来上がっているは ずである。星本体も主系列段階(水素の核融合反応が 進行)に至り、周囲には太陽系におけるカイパーベル トや小惑星帯に対応するような、デブリ(残骸)円盤 が残る。なお、この描像は、今のところ恒星の重さが 3倍程度以下の場合にのみ当てはまると考えておいた 方が良い。星は重いほど進化が速く、太陽のおよそ8 倍より重い大質量星は、可視光で見える頃にはすでに 主系列に達している (Palla and Stahler, 1999)。ま た, それらについては太陽からの距離が遠く観測が非 常に難しいという事情もあり、星・惑星形成過程の理 解が遅れている。

円盤を構成するのは、もともとは宇宙空間に漂って いた星間物質である。星間物質は重さにしておよそ1 %は固体微粒子(「ダスト」と呼ばれる),残りは主に 水素、ヘリウムから成るガスから成っている。星間ダ ストの大きさはサブミクロン(0.1 µm)以下である と考えられており, 主にシリケイト (ケイ酸塩) と炭 素質ダストの混合物である (Draine, 2003)。このダ ストの一部は、特定の熱・密度環境下で変性を受けな がら,ゆくゆくは地球のような岩石惑星,あるいは巨 大ガス惑星の芯 (コア)となる。一方,円盤ガスは巨 大惑星の原材料である。星間空間では150種類以上の 有機分子が検出されており,これらも分子雲からエン ベロープ、原始惑星系円盤に取り込まれると考えられ る(Herbst and van Dischoeck, 2009)。原始惑星系 円盤内に存在する若い惑星は、その周囲の円盤ガスと 角運動量のやりとりを行うため、ガスの存在は惑星の 軌道進化に大きな影響を与えるという点でも重要であ る。

円盤中で木星のような惑星が作られる過程について は、大雑把には2つのシナリオを念頭に置くのが分か りやすい。一つは、コア集積モデル(Mizuno、1980; Pollack et al., 1996) と呼ばれ, 原始惑星系円盤内に 存在するサブミクロンのダストが集まってキロメート ルサイズの微惑星になり、それらの衝突合体で原始惑 星ができる。そして十分重くなった惑星が円盤ガスを 捕獲する。これは長く惑星形成理論の標準とされてき たモデルである。ただしダストから微惑星への成長過 程は大きな未解決問題のひとつであり、微惑星までの 道のりにはいくつもの障壁があることが理論、実験か ら知られている (Blum and Wurm, 2008)。もう一つ は、円盤ガスの重力不安定説である。この説では原始 惑星系円盤自身が自己重力で高密度の塊に分裂し、惑 星となる (Cameron, 1978; Boss, 1997)。コア集積で は説明が難しい観測結果が得られるにつれ (Marois et al., 2008), 改めて注目されるようになった仮説であ る。例えば、コア集積モデルでは形成に比較的時間が かかる(~1000万年)のに対して,重力不安定であ ればすぐに惑星ができるため年齢10~100万年の星に 惑星が付随する可能性がある。また、コア集積の場 合,固体材料物質が多く集まる円盤内側(太陽系での 木星軌道付近)で重い惑星を作ることになるが、重力 不安定は逆に円盤外側の冷たい領域(10~100 AU) で起きやすい。実際にどちらのシナリオで惑星形成が 起きているのか、あるいはどちらが優勢かを知るに は、原始惑星系円盤の密度分布や円盤構造の進化の仕 方,惑星の存在場所などが手がかりとなる。

## 4. 星周円盤の観測

#### 4.1 円盤の存在

若い星に円盤状の扁平な構造が付随することは、極 方向に偏った物質放出(ジェット、アウトフロー)や 空間的にひろがった赤外線放射などから示唆されてい た(Mundt and Fried, 1983; Appenzeller *et al.*, 1984; Grasdalen *et al.*, 1984)。しかし普遍性が確認された のは、中間・遠赤外線や電波でデータが取得されるよ うになってからであり、特に1983年に打ち上げられ た赤外線衛星 IRAS の寄与は大きい。円盤の構成要素 であるダストが星の周囲に存在すると、ダストは星か らの紫外線や可視光放射を受けてあたたまり、赤外線 や電波領域で自ら再放射を行う。そのため、星本体か ら予想されるよりも天体からの赤外線総量が大きけれ ば(赤外超過)、星の周囲にダストが存在しているこ



Fig. 3 Illustrative sketches showing how to diagnose circumstellar disks. Top diagrams show the wavelength dependence of the flux from the whole system (spectral energy distribution). Excess emission above the stellar radiation (infrared excess) is the evidence of circumstellar heated grains. For instance, a disk with an inner hole has excess emission only at long wavelengths since there are no hotter grains emitting at shorter wavelengths.

とが分かる。また,星に近いダストほど熱いため短い 波長で,遠いダストほど冷たいので長い波長で明るく なる。したがって複数の波長で観測し,波長依存性 (エネルギー分布)を調べれば,円盤のだいたいの構 造も予想できる(e.g., Wilking *et al.*, 1989; Adams *et al.*, 1987)(Fig. 3)。おうし座分子雲などにある Tタ ウリ型星の多数に星周円盤が付随することが確認され たのは,IRAS によるこの赤外超過の検出によってで ある(Rucinski, 1985; Strom *et al.*, 1989; Kenyon *et al.*, 1990)。IRAS の後も,感度や空間分解能,分光 機能等の向上が図られた ISO,Spitzer,AKARI, Herschel といった赤外線宇宙望遠鏡により,寿命や 構造進化など多岐に渡る円盤の性質について,統計学 的研究が進められている。

#### 4.2 円盤の寿命

原始惑星系円盤の寿命は,惑星形成論に時間的制約 を与える。観測的には,前述の赤外超過などを利用す れば,円盤物質がいつ無くなるかが分かる。地上から 検出可能な近赤外線での超過を用いて円盤保有率を求 めたのが Haisch *et al.* (2001)である。彼らは,ひ とつの星形成領域・星団に属するメンバー星の何割に 近赤外超過が付随するかを,様々な年齢(30万~3000 万年)の領域・星団を使って調べた。そして,若い星 団内では8割以上の星が円盤を保持しているが,年齢 300万年頃の星団になると5割の星が近赤外超過を失 うことを示した。同様の調査を,星へ円盤ガスが降り 積もっている証拠や(星周ガスの存在),Spitzer 宇 宙望遠鏡による新しい赤外超過の測定(星周ダストの 存在)を加えて拡張したのが Mamajek (2009)であ り,やはり200万年程度で円盤の存在率は半分程度に 落ちるという全体の傾向を確認している。また,1000 万年までに数%以下になるが,ゼロになることはな く,実際に TW Hya (年齢約800万年)など,年齢が 比較的大きいにも関わらずガス・ダストの豊富な円盤 を持つ天体の存在が知られている。

このような近赤外線超過や星への降着ガスを指標に した解析では、円盤のごく内側(<1AU)に物質が 残っているかどうかを確認したことになる。そのため 太陽系の惑星が存在するような領域での円盤の寿命を 調べるには、中間赤外線より長い波長の観測が必要と なる。長波長では一般に観測の感度が問題になるが, Spitzer 望遠鏡はそれまでの赤外線用宇宙望遠鏡に比 べて格段に高い感度を持ち、特に波長24ミクロンで 多くの星形成領域の観測が行われた。その結果、近赤 外線で超過を示さない大多数の天体には24ミクロン でも超過は検出されなかったことから、円盤は半径に 大きく依存せず一様に散逸するであろうこと,また, 1000万年を超えると光学的に厚い原始惑星系円盤は ほとんど存在しないことが示されている (Cieza et al., 2007; Silverstone et al., 2006)。さらに、サブミリ・ ミリ波(星からおよそ50 AU 以遠も調べられる)に おいても同様の観測結果となっており(Andrews and Williams, 2005; Carpenter et al., 2005), 結局, 円盤 はすべての領域にわたって同じようなタイムスケール で消失する可能性が高いことが分かっている。ちなみ に,大多数の星は孤立した状態でなく重力的に束縛さ れた別の星を持つ, つまり連星系として存在すること も忘れてはならない。連星系を成す2星の間の距離が 100 AU 程度(単独星の場合の典型的大きさ)以下の 場合、それぞれの星に付随する円盤は重力相互作用に より削られて小さくなるため (Artymowicz and Lubow, 1994) 円盤寿命が短くなることが予想され, 実際,観測によってこの効果が確認されている (Bouwman et al., 2006).

#### 4.3 円盤の重さ

円 盤 質 量 に 関 す る 最 初 の 大 規 模 な 観 測 は, Beckwith *et al.* (1990) による電波観測である。彼ら はおうし座分子雲に存在する37個の T タウリ型星に ついて, 1.3ミリメートルでダスト再放射を検出し

た。若い原始惑星系円盤は可視光や赤外線に対して不 透明だが、波長がミリメートルになると円盤の奥深く を見通し、質量を担う大部分のダストからの放射をと らえることができる。そのため、あとはダストの温度 やミリ波での放射効率、またガス成分も加味するため にガスとダストの質量比(星間空間の値100)を考慮 すれば, 観測した放射量を円盤全体の重さに換算する ことができる。Beckwith et al. (1990) はこのように して, 原始太陽系の最小質量程度かそれより重い円 盤、つまり太陽系のような惑星系を形成するのに足る 重さの円盤が多数存在することを示した。また Andrews and Williams (2005) はこれを拡張して同 じおうし座分子雲にある93天体についてサブミリ波 (350,850ミクロン)での放射量の測定を行い、典 型的な円盤質量は木星の5倍程度であると報告してい る。これは、T タウリ型星の典型的な質量は太陽の半 分であるから,星の1%程度に相当する。これらの観 測から、Tタウリ段階での円盤は惑星系を作るのに十 分重く、また最小質量モデルが良い近似になっている ということが言える。ただし、留意すべき点がいくつ かある。一つは、天体によって円盤の質量が2桁以上 もばらつくということである (Andrews and Williams, 2005では標準偏差が0.5 dex)。観測は同一の星 形成領域にあるTタウリ型星を対象にしているか ら、星の重さや年齢(約200万年)に大きさ差異はな いと仮定できる。もう一つは、どちらの観測にも、未 検出に終わった天体が大雑把に言って検出数と同じく らい存在するという点である。さらには、円盤総質量 はダストの重さを基準とし、ガスがダストの100倍存 在するという仮定を使って計算することが多いが、こ の星間空間で成り立つ質量比が円盤内で維持されてい る保証はない。最後に、以下の理由により、この方法 で見積もった円盤質量は実際の質量の下限値になって いる可能性がある。基本的に、観測しやすいものの大 きさ(ここでは円盤を構成する固体物質)は観測波長 程度であり、明るさを質量に換算する際に考慮する、 ミリ波での放射効率がそれを表している (D'Alessio, 2001)。つまり、もしすでに微惑星や原始惑星が形成 されていれば円盤質量は桁で増える可能性もあるが, これらはミリ波・サブミリ波観測から導出された質量 には含まれない。ということは、年齢100万年程度の 天体の半数はこれから惑星を作るだけの材料を持つ が,残りの半分は,何らかの理由で円盤を早々に失い 惑星系を形成できないか、あるいは、すでに惑星系を

作り終わってしまったと推測することもできる。

これまでの惑星形成を意識した研究においては,対 象はどちらかといえばエンベロープ散逸後の年齢100 万年程度の円盤に偏っていた。円盤そのものを観測し やすいというのも理由の一つだろう。しかし最近は, より若い段階の星形成初期から惑星形成を追いかける 必要があろうとの認識が大きくなっている。例えば Greaves and Rice (2011) はエンベロープに埋もれ た初期円盤の重さの見積りから,惑星形成は年齢10 万年程度ですでに始まっており,残存している物質が 100万年程度の円盤として見えている可能性もあるの ではないかと指摘している。

#### 4.4 構造の進化

4.2節で、円盤寿命は星からの距離によらず同じで あろうと述べた。しかしまれに、近赤外線超過が無 い、あるいは小さいにも関わらず、中間赤外線で大き な超過を示す天体も見つかっている。これらは遷移円 盤と呼ばれ、密度の高い原始惑星系円盤から、薄いデ ブリ円盤への進化の途中にあると考えられている (e.g., Calvet *et al.*, 2005)。そのため、円盤進化、す なわち惑星形成メカニズムを理解する上で大変重要な 研究対象であると認識されている。円盤の構造として は、熱いダストが無い、つまり中心星の近傍(<1~ 10 AU) にダストの穴,あるいはギャップが空いてい る状態だと考えることができる (Fig. 2)。また、そ のような天体の数が少ない(年齢およそ100万年で1 ~10%)ということは、遷移がすばやく(星の年齢 よりも速く) 起こる,または進化の仕方が全ての天体 について共通でないことを示唆している。後者につい ては実際、穴の開く段階を持たず一様に消失するよう な進化パスも並行して存在するのではないかという議 論がある (Currie and Kenyon, 2009)。

では、なぜ穴やギャップといった構造ができるのだろうか。巨大惑星が存在すれば軌道に沿って円盤に ギャップが空くと考えられるが、他にもっともらしい 原因として考えられているのが、光蒸発とダストの成 長である。光蒸発は、星あるいは星のごく近傍領域か らのX線や紫外線により円盤ガスが加熱され、その うち中心星の重力で束縛できない外側のガスが流出す る現象である(Hollenbach et al., 1994)。一方、内側 のガスは星に降り積もり続けるため、結果として穴が 空くことになる。光蒸発による散逸は円盤がある程度 軽くなった段階で効果的に働き、10万年程度という 速いタイムスケールでの穴の形成を説明できる (Clarke *et al.*, 2001)。また,赤外超過から判定する 穴は,赤外超過の原因となるダストが無いということ を意味するのであって,微惑星が存在するかもしれな いし,ガスは残っているかもしれない。そのため,ダ ストが成長したことによるダストの穴,という可能性 もある (Dullemond and Dominik, 2005)。

特に近年,この穴やギャップの成因を特定すること が円盤進化の研究において大きな課題となっている が,理論予測にも不定性があり,それを検証するため の観測データも十分でないため,決定的なことは分 かっていない。今のところは,光蒸発で説明できない ほど大きな穴が空いている遷移円盤には惑星系が付随 するのではないかという議論が多い。いずれにして も,次に述べるような星近傍に迫る撮像観測も組み合 わせながら,穴・ギャップ内外におけるダスト・ガス の空間分布や運動などを詳細に調べる必要がある (e.g., Andrews *et al.*, 2011)。

#### 5. 円盤の微細構造の観測

#### 5.1 直接観測の鍵:高解像度

遷移円盤の例のように、エネルギー分布はダストの 温度を反映し、おおまかな円盤構造を議論できる。し かし構造を決める複数のパラメータが縮退するため, 統計を論じるには有用だが、1個の円盤の真の構造を 決めるには情報が圧倒的に不足する。本当のところど うなっているのかを知るには、構造を空間的に分解し て観測することが必須なのである。ハッブル宇宙望遠 鏡は、90年代からすでに直接円盤構造を撮影するこ とに成功している。ただしハッブルで観測できる可視 光・近赤外領域では、星は円盤に比べて非常に明るい ので、円盤が星の光に埋もれてしまう。そのため観測 できたのは、偶然にも高密度の円盤赤道面が観測者の 視線上にあり,赤道面が星を隠してくれるエッジオン 円盤や (Burrows et al., 1996; Stapelfeldt et al., 1998)、電離ガスで明るく光る大質量形成領域にあっ て高密度円盤が背景の光を吸収し暗く浮かび上がるシ ルエット円盤など (McCaughrean and O'dell, 1996),特殊な状況に限られていた。また,電波(ミ リ波)干渉計による観測では円盤のケプラー回転運動 がとらえられるようになっていたが (Simon et al., 2000; Mannings et al., 1997; Dutrey et al., 1994), 解 像度が不十分であり、半径数100 AU にひろがる大き な円盤の大局的な速度構造が分かるに過ぎなかった。 つまり、この頃はまだ理論研究でよく仮定されるよう

な,べき乗(一様),軸対称という描像から離れる必 要はあまり無かったのである。

円盤観測のための解像度としては、円盤の典型的サ イズは100 AU 程度であるから、10 AU ぐらいは欲し い。若い星が存在する星形成領域までの距離は太陽近 傍でも140パーセク程度(1パーセクは3×10<sup>16</sup>メート ル) であるから, 0.1秒角の分解能があれば, 14 AU より大きい構造が判別できる。高い解像度を達成する のに必要な要素は、光の回折限界が何によって決まる かを思い出すと分かる。無限遠の点光源からの光を有 限の大きさの望遠鏡開口で集めると、観測波長と開口 サイズの比で決まる大きさの像が得られる。つまり, 波長は短い方が、望遠鏡は大きい方が有利である。た だし、異なる波長での観測はそれぞれ別の情報をもた らし、それらを総合的に考慮することでようやく天体 の性質に迫ることができるという側面があるから、結 局どの波長においても大きな開口が重要ということに なる。可視光,近赤外線領域(約1~5ミクロン)に おいては8~10メートル級の大型望遠鏡がいくつか稼 働しており、日本もハワイに「すばる」望遠鏡を有し ている。例えばすばるの口径8.2メートルを用いて回 折限界を計算すると,円盤観測に必要な解像度は容易 に得られることが分かる。ところが、ここで問題とな るのが地球大気のゆらぎである。地上から観測する場 合, 天体の光はどうしても地球大気を通過することに なるが、大気ゆらぎは0.1秒角よりずっと大きいた め、解像度が大気によって制限されてしまう。これを 解決するのが、補償光学である。天体からやってくる 光の波面の歪みを検出し、変形する鏡を使って補正し てから検出器に導入する。このリアルタイムの補正の おかげで、すばるでも近赤外線領域においてほぼ回折 限界(1.65ミクロンで0.06秒角)が得られている。

前節で述べたように,近赤外線のような比較的短い 波長での放射は,熱いダスト,つまり星の近くに存在 するダストからのものとなる。しかし補償光学と1個 の大口径望遠鏡を組み合わせても,そのような星近傍 を空間的に分解して撮影できるだけの解像度は得られ ない。一方,熱放射に比べると量は少ないものの,星 からの光の一部は円盤ダストに当たって散乱され,観 測者に届く。この散乱光であれば,星から遠い領域も 検出可能である。しかも散乱は入射光と散乱体との相 互作用であるから,散乱された光は散乱体に関する情 報 (大きさ,組成等)を運んでくる。ちなみに,密度 の高い原始惑星系円盤は近赤外線に対して不透明にな るため、円盤の深部まで調べることはできないが、電 波であれば円盤赤道面付近の情報を得ることが可能と なり、円盤全体の重さを見積ることもできる。波長が 長いので高解像度を得るには巨大望遠鏡が必要という ことになるが、複数の望遠鏡から成る干渉計を利用す れば、2台の望遠鏡間距離を1個の開口直径とみなし た場合に相当する解像度を得ることができる。これま での電波干渉計では0.1秒角を得るのは難しかった が、稼働を始めた大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMAによって近いうちに数ミリ秒角の解像度が達 成される見込みであり、円盤の密度分布等の理解が飛 躍的に進むと期待される。

#### 5.2 原始惑星系円盤の撮像

高解像度撮像の最新成果のひとつに、すばる望遠鏡 による AB Aurigae の観測がある(Hashimoto et al., 2011)。AB Aurigae は年齢約300万年の前主系列星 で、太陽の2倍程度の重さを持つ。円盤ダストによる 赤外線放射が検出されており、原始惑星系円盤を持つ 天体であることは古くから知られている(Fig. 3)。 また、すばるの旧世代の補償光学と近赤外線カメラを 使った観測により半径約120 AU 以遠の様子が撮影 され、スパイラル状の構造が明らかになっていた

(Fukagawa et al., 2004)。スパイラル構造は円盤の 自己重力が無視できないということを示唆するものだ が、円盤外縁しかとらえられなかったこともあり、円 盤構造と惑星との関連に迫るのは難しかった。一方、 最新のすばる観測では空間分解能9AU(0.06秒角) が達成され、しかも、星の光は無偏光だが散乱光は偏 光するという事実を利用した観測方法によって、従来 よりもずっと星に近い場所(半径約22AU以遠)が 観測されている(Fig. 4)。ここで見えてきたのは、 単純に外側のスパイラル構造の延長ではなく、半径方 向のギャップや所々に凹みのあるリングなど、非常に 複雑な構造だった。特にギャップは惑星の存在を一番 に思い起こさせるものであり、ギャップ内の惑星と周 囲の円盤物質との相互作用が見えている可能性があ る。

高解像度撮像で検出された原始惑星系円盤は,数は 非常に少ないが徐々に増えてきており,そのほとんど が AB Aurigae の例のように,赤外超過の波長依存性 (エネルギー分布)だけからは想像できない,複雑か つ多様な形態を示す。もちろん,解像度が高くなると 多様性が際立つという側面もあるため,統計的なゆら ぎを抑えて進化のパスを描くことを目標に,データの



Fig. 4 Examples of SEDs for young stars with protoplanetary disks. Their evolutionary stages roughly correspond to (c) in Fig. 2. The dots are observed data points while the solid line indicates the stellar model.

積み重ねが行われている最中である。ただし最近の観 測からひとつ言えるのは、より円盤内側の撮影が可能 になるにつれて、特にギャップや穴といった特徴を示 す遷移円盤の多くで、惑星の存在を示唆するような構 造が顕著になりつつあるということである。また、円 盤の回転は内側の方が速いため、時間(数年)を置い た観測によって構造の運動もとらえやすくなる。惑星 起因の構造は、構造そのものでなく惑星が存在する場 所の回転速度で動くと考えられる場合もあり、今後は 惑星と円盤との関連を明らかにする目的で、同じ天体 を見続けるモニター観測も増えてくるかもしれない。 ちなみに、円盤中で生まれたばかりの惑星そのものが きちんと検出されたことはまだないが、観測装置の能 力としては足りており (感度,空間分解能),近い将 来,惑星本体の検出の報告があるのではないかと期待 される。

同様に非対称な構造が明らかになっている天体に HD 142527と呼ばれる前主系列星がある。年齢は約 500万年で,この星も太陽の2倍程度の重さを持つ。 HD 142527の原始惑星系円盤は赤外線領域の複数の



Fig. 5 1.6- $\mu$ m image of the protoplanetary disk around a young star named AB Aurigae (Hashimoto *et al.*, 2011). The disk is seen in the light scattered by dust grains. The star was occulted by a mask in the camera and such central region is indicated by a black circle. The spatial resolution achieved is 0.06 arc-second which corresponds to about 9 AU in panels (a), (c), and (d). The panel (b) shows the previous result taken with an old instrument at a resolution of 14 AU for comparison. The new observations have revealed quite complex structure in the inner region (>22 AU in radius).

波長で直接撮像されており、幅100 AU 程度にもおよ ぶ大きなギャップの存在が明らかになっている。複数 の波長で観測されているということは、散乱光の 「色」が得られるということだが、色は散乱体の大き さや組成といった性質を反映する。例えば、光の波長 に比べて散乱体が十分小さければ (レーリー散乱), 空が青いのと同じように散乱光は青くなり、散乱体が 波長と同程度の大きさになってくると (ミー散乱), 光源の色と変わらなくなってくる。HD 142527の色 は光源である星と似たような色をしており、もともと サブミクロンだったダストがミクロンサイズ(波長程 度)まで成長していることが示唆される。このように 原始惑星系円盤では、散乱の色だけでなく赤外線分光 や電波観測からも、ダスト成長の証拠は広く見つかっ ている (Lommen et al., 2010; Beckwith and Sargent, 1991)。さらにこの円盤について興味深いのは、氷ダ ストの分布が散乱光の観測によって検出されているこ



Fig. 6 Detection of icy grains toward a protoplanetary disk around the young star HD 142527 (Honda *et al.*, 2009). The image obtained at  $3.08 \,\mu\text{m}$  is shown in the top panel. The bottom diagram shows the wavelength dependence of the disk surface brightness measured at three locations labeled as A, B, and C in the top panel. The dip at  $3.08 \,\mu\text{m}$  is clearly seen, suggesting the presence of icy grains in the disk.

とである(Honda et al., 2009)。氷は波長3.1ミクロ ンの光を特に吸収する性質があるため,氷まじりのダ ストが光を散乱する場合,3.1ミクロンの光だけが吸 収され,他の波長の光に比べて暗くなることが予想さ れる。そこで Honda et al. (2009)はすばるを用いて 3.1ミクロンの観測を行い,実際にこの吸収が存在す ることを確認した(Fig. 6)。氷の円盤内での空間分 布は,惑星の作りやすさや水の起源などに関連する。 この種の観測はまだ1天体についてのみ,しかも星か ら遠い領域(100 AU 以遠)での調査しか行われてい ないが、こういった特定の物質の空間分布を見分ける ための試行錯誤は、今後さらに増えていくだろう。

#### 5.3 デブリ円盤の撮像

原始惑星系円盤が散逸し、星が主系列段階に至った 後にも(1000万年以降)、少量のダストが赤外超過と して検出されることがある。このように長く生き残っ ているダストは、微惑星どうしの衝突によって新たに 生成されたものであると考えられている。そのため円 盤は惑星形成活動の名残であろうとして、デブリ(残 骸) 円盤と呼ばれる。ただし、デブリ円盤があるから といって必ずそこに惑星系が付随するかどうかは,ま だ観測的に確かめられているわけではなく、デブリ円 盤の性質と惑星形成史をいかにリンクさせるかが課題 となっている。多くのデブリ円盤は、その赤外超過が 長い波長(遠赤外線、ミリ波)でのみ検出されること から、星から離れた場所に冷たいダストが分布すると いう構造をとることが知られている。これは、太陽系 でのカイパーベルトに相当するというイメージである が、従来の赤外線望遠鏡では感度が足りずに太陽系の ようなシステムを検出することができなかった。しか し最近は2009年に打ち上げられた Herschel 宇宙望遠 鏡によってカイパーベルト程度のダスト量を持つ円盤 からの赤外線放射も検出できるようになり、円盤の検 出数は増え続けている(Eiroa et al., 2010)。

デブリ円盤についても主にハッブル宇宙望遠鏡を用いた撮像観測が進んでおり,現在までに15個程度の空間分解例がある。その中で,若い主系列星 HR 4796 に付随するデブリ円盤については,可視光・近赤外線域の7つの波長で円盤ダストによる散乱光が測定されている(Debes *et al.*, 2008)。その結果, HR 4796のデブリ円盤からの散乱光は,可視光から近赤外線にかけて赤くなることが分かっている。Debes *et al.* 

(2008)はこの散乱の赤い色を,土星の衛星タイタンの高層大気中にあるソリン(tholin)と呼ばれる有機物を含むダストを使って再現してみせた。デブリ円盤があるということは,太陽系における彗星や小惑星のような小天体どうしが衝突してさらに小さいダストが生成されている可能性があるため,小天体に含まれていた有機物が撒き散らされているのではないかとも想像されている。このように,特にデブリ円盤では,どの種の物質がどこに分布するかという研究が円盤内の広い領域で可能になっており,その際,太陽系内天体との比較という観点で議論がなされることが増えて

きている (Lisse et al., 2009)。

#### 6.まとめ

系外惑星分野では、惑星の数を数え、特にそれらの 力学的性質(質量, 軌道)に関する全体像を得るとい う作業、また、見つかった惑星の密度、表面重力や大 気組成などを詳しく調べるという研究が精力的に進め られている。そして最終的なゴールの一つが、それら 惑星系がどのようにして形成されたのかを理解するこ とである。形成を議論するには,惑星がまさに誕生す る現場、すなわち若い星をとりまく原始惑星系円盤を 詳しく調べることが不可欠である。特に、系外惑星系 の様相が太陽系とは大きく異なることからも類推され るように、系外惑星系形成の出発点は原始太陽系星雲 とは限らない。実在する円盤について、性質の多様 性, 普遍性の切り分けを常に念頭に置きながら, 構造 や進化を観測的に求める努力が続いている。円盤の存 在自体は、星によってあたためられた円盤ダストによ る赤外線放射(赤外超過)を検出するという方法で調 べられてきた。これにより円盤の寿命やおおまかな構 造進化といった惑星形成に深く関連する性質が明らか になってきている。一方, 直接円盤の構造を撮影する 観測も進んでおり、解像度の向上や観測方法の工夫に よって,より星の近傍の様子が分かるようになってき た。その結果, 生まれたばかりの惑星の存在を強く示 唆する構造が顕になってきている。また,どのような 種類の物質が円盤内のどこに存在するかを調べること が可能になっており、今後、物質の変性や円盤内輸送 について理解が進むことが期待される。

従来,天文学の中では太陽系内と系外の研究はどち らかと言えば分離した形で進んでいたが,アストロバ イオロジーという言葉も普及している今日では,系内 と系外,さらに言えば化学,生物学といった分野と の,有機的な結びつきの必要性が認識されているとこ ろである。もちろん,具体的に何をするかという話に なると,まだまだ分野間の距離を感じる場面は多い。 しかし5.2,5.3節で見たように,研究者の意識によっ て得られたデータの解釈の重要性がより増すという点 は疑いがなく,積極的に交流を進める雰囲気も出てき ていると言えるだろう。

#### 引用文献

- Adams, F. C., Lada, C. J. and Shu, F. H. (1987) Spectral evolution of young stellar objects. *The Astrophysical Jour*nal, 312, 788-806.
- Andrews, S. M. and Williams, J. P. (2005) Circumstellar dust disks in Taurus-Auriga: The submillimeter perspective. *The Astrophysical Journal*, **631**, 1134–1160.
- Andrews, S. M., Wilner, D. J., Espaillat, C., Hughes, A. M., Dullemond, C. P., McClure, M. K., Qi, C. and Brown, J. M. (2011) Resolved images of large cavities in protoplanetary transition disks. *The Astrophysical Journal*, **732**, id. 42.
- Appenzeller, I., Jankovics, I. and Oestreicher, R. (1984) Forbidden-line profiles of T Tauri stars. Astronomy and Astrophysics, 141, 108-115.
- Artymowicz, P. and Lubow, S. H. (1994) Dynamics of binarydisk interaction. 1: Resonances and disk gap sizes. *The Astrophysical Journal*, 421, 651–667.
- Beckwith, S. V. W. and Sargent, A. I. (1991) Particle emissivity in circumstellar disks. *The Astrophysical Journal*, 381, 250–258.
- Beckwith, S. V. W., Sargent, A. I., Chini, R. S. and Guesten, R. (1990) A survey for circumstellar disks around young stellar objects. Astronomical Journal, 99, 924–945.
- Borucki, W. J., Koch, D. G., Basri, G., Batalha, N., Brown, T. M., Bryson, S. T., Caldwell, D., Christensen-Dalsgaard, J., Cochran, W. D., DeVore, E., Dunham, E. W., Gautier, T. N. III., Geary, J. C., Gilliland, R., Gould, A., Howell, S. B., Jenkins, J. M., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Marcy, G. W., Rowe, J., Sasselov, D., Boss, A., Charbonneau, D., Ciardi, D., Doyle, L., Dupree, A. K., Ford, E. B., Fortney, J., Holman, M. J., Seager, S., Steffen, J. H., Tarter, J., Welsh, W. F., Allen, C., Buchhave, L. A., Christiansen, J. L., Clarke, B. D., Das, S., Désert, J. M., Endl, M., Fabrycky, D., Fressin, F., Haas, M., Horch, E., Howard, A., Isaacson, H., Kjeldsen, H., Kolodziejczak, J., Kulesa, C., Li, J., Lucas, P. W., Machalek, P., McCarthy, D., MacQueen, P., Meibom, S., Miquel, T., Prsa, A., Quinn, S. N., Quintana, E. V., Ragozzine, D., Sherry, W., Shporer, A., Tenenbaum, P., Torres, G., Twicken, J. D., Van Cleve, J., Walkowicz, L., Witteborn, F. C. and Still, M. (2011) Characteristics of planetary candidates observed by Kepler. II. Analysis of the first four months of data. The Astrophysical Journal, 736, id. 19.
- Boss, A. P. (1997) Giant planet formation by gravitational instability. *Science*, **276**, 1836–1839.
- Bouwman, J., Lawson, W. A., Dominik, C., Feigelson, E. D., Henning, T., Tielens, A. G. G. M. and Waters, L. B. F. M. (2006) Binarity as a key factor in protoplanetary disk evolution: Spitzer disk census of the  $\eta$  chamaeleontis cluster. *The Astrophysical Journal*, **653**, L57–L60.
- Blandford, R. D. and Committee for a Decadal Survey of Astronomy and Astrophysics 2010, *New Worlds, New Hori-*

zons in Astronomy and Astrophysics, The National Academies Press: Washington, D.C..

- Blum, J. and Wurm, G. (2008) The growth mechanisms of macroscopic bodies in protoplanetary disks. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 46, 21–56.
- Burrows, C. J., Stapelfeldt, K. R., Watson, A. M., Krist, J. E., Ballester, G. E., Clarke, J. T., Crisp, D., Gallagher, J. S. III., Griffiths, R. E., Hester, J. J., Hoessel, J. G., Holtzman, J. A., Mould, J. R., Scowen, P. A., Trauger, J. T. and Westphal, J. A. (1996) Hubble space telescope observations of the disk and jet of HH 30. *The Astrophysical Journal*, 473, 437–451.
- Calvet, N., D'Alessio, P., Watson, D. M., Franco-Hernández, R., Furlan, E., Green, J., Sutter, P. M., Forrest, W. J., Hartmann, L., Uchida, K. I., Keller, L. D., Sargent, B., Najita, J., Herter, T. L., Barry, D. J. and Hall, P. (2005) Disks in transition in the Taurus population: Spitzer IRS spectra of GM Aurigae and DM Tauri. *The Astrophysical Journal*, 630, L185–L188.
- Cameron, A. G. W. (1978) Physics of the primitive solar accretion disk. Moon and Planets, 18, 5–40.
- Carpenter, J. M., Wolf, S., Schreyer, K., Launhardt, R. and Henning, T. (2005) Evolution of cold circunistellar dust around solar-type stars. *The Astronomical Journal*, **129**, 1049–1062.
- Chiang, E. I. and Goldreich, P. (1997) Spectral energy distributions of T Tauri stars with passive circumstellar disks. *The Astrophysical Journal*, **490**, 368–376.
- Cieza, L., Padgett, D. L., Stapelfeldt, K. R., Augereau, J. C., Harvey, P., Evans, N. J. II., Merín, B., Koerner, D., Sargent, A., van Dishoeck, E. F., Allen, L., Blake, G., Brooke, T., Chapman, N., Huard, T., Lai, S. P., Mundy, L., Myers, P. C., Spiesman, W. and Wahhaj, Z. (2007) The Spitzer c2d survey of weak-line T Tauri Stars. II. New constraints on the timescale for planet building. *The Astrophysical Journal*, **667**, 308–328.
- Clarke, C. J., Gendrin, A. and Sotomayor, M. (2001) The dispersal of circumstellar discs: the role of the ultraviolet switch. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soci*ety, **328**, 485–491.
- Currie, T. and Kenyon, S. J. (2009) Deep MIPS Observations of the IC 348 nebula: constraints on the evolutionary state of anemic circumstellar disks and the primordial-todebris disk transition. *The Astronomical Journal*, **138**, 703–726.
- D'Alessio, P., Canto, J., Calvet, N. and Lizano, S. (1998) Accretion disks around young objects. I. The detailed vertical structure. *The Astrophysical Journal*, **500**, 411–427.
- D'Alessio, P., Calvet, N. and Hartmann, L. (2001) Accretion disks around young objects. III. Grain growth. *The Astrophysical Journal*, **553**, 321–334.
- Debes, J. H., Weinberger, A. J. and Schneider, G. (2008) Complex organic materials in the circumstellar disk of HR 4796A. *The Astrophysical Journal*, 673, L191–L194.

- Dullemond, C. P. and Dominik, C. (2005) Dust coagulation in protoplanetary disks: A rapid depletion of small grains. Astronomy and Astrophysics, 434, 971–986.
- Draine, B. T. (2003) Interstellar Dust Grains. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **41**, 241–289.
- Dutrey, A., Guilloteau, S. and Simon, M. (1994) Images of the GG Tauri rotating ring. Astronomy and Astrophysics, 286, 149-159.
- Eiroa, C., Fedele, D., Maldonado, J., González-García, B. M., Rodmann, J., Heras, A. M., Pilbratt, G. L., Augereau, J. C., Mora, A., Montesinos, B., Ardila, D., Bryden, G., Liseau, R., Stapelfeldt, K., Launhardt, R., Solano, E., Bayo, A., Absil, O., Arévalo, M., Barrado, D., Beichmann, C., Danchi, W., del Burgo, C., Ertel, S., Fridlund, M., Fukagawa, M., Gutiérrez, R., Grün, E., Kamp, I., Krivov, A., Lebreton, J., Löhne, T., Lorente, R., Marshall, J., Martínez-Arnáiz, R., Meeus, G., Montes, D., Morbidelli, A., Müller, S., Mutschke, H., Nakagawa, T., Olofsson, G., Ribas, I., Roberge, A., Sanz-Forcada, J., Thébault, P., Walker, H., White, G. J. and Wolf, S. (2010) Cold DUst around NEarby Stars (DUNES). First results. A resolved exo-Kuiper belt around the solar-like star ζ2 Ret. Astronomy and Astrophysics, 518, id. L131.
- Fukagawa, M., Hayashi, M., Tamura, M., Itoh, Y., Hayashi, S. S., Oasa, Y., Takeuchi, T., Morino, J., Murakawa, K., Oya, S., Yamashita, T., Suto, H., Mayama, S., Naoi, T., Ishii, M., Pyo, T. S., Nishikawa, T., Takato, N., Usuda, T., Ando, H., Iye, M., Miyama, S. M. and Kaifu, N. (2004) Spiral Structure in the Circumstellar Disk around AB Aurigae. *The Astrophysical Journal*, **605**, L53–L56.
- Gaudi, B. S. (2010) In: *Exoplanets* (ed. S. Seager), the Space Science Series of the University of Arizona Press, Tucson, AZ, 79.
- Grasdalen, G. L., Strom, S. E., Strom, K. M., Capps, R. W., Thompson, D. and Castelaz, M. (1984) High spatial resolution IR observations of young stellar objects - A possible disk surrounding HL Tauri. *The Astrophysical Journal*, 283, L57–L61.
- Greaves, J. S. and Rice, W. K. M. (2011) Do all Sun-like stars have planets? Inferences from the disc mass reservoirs of Class 0 protostars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **412**, L88–L92.
- Haisch, K. E., Jr., Lada, E. A. and Lada, C. J. (2001) Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters. *The Astro*physical Journal, 553, L153–L156.
- Hartmann, L. (2009) Accretion Processes in Star Formation: Second Edition (ed. L. Hartmann), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hashimoto, J., Tamura, M., Muto, T., Kudo, T., Fukagawa, M., Fukue, T., Goto, M., Grady, C. A., Henning, T., Hodapp, K., Honda, M., Inutsuka, S., Kokubo, E., Knapp, G., McElwain, M. W., Momose, M., Ohashi, N., Okamoto, Y. K., Takami, M., Turner, E. L., Wisniewski, J., Janson, M., Abe, L., Brandner, W., Carson, J., Egner, S., Feldt,

M., Golota, T., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S., Ishii, M., Kandori, R., Kusakabe, N., Matsuo, T., Mayama, S., Miyama, S., Morino, J. -I., Moro-Martin, A., Nishimura, T., Pyo, T. -S., Suto, H., Suzuki, R., Takato, N., Terada, H., Thalmann, C., Tomono, D., Watanabe, M., Yamada, T., Takami, H. and Usuda, T. (2011) Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planetforming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae. *The Astrophysical Journal Letters*, **729**, DOI: 10.1088/2041-8205/729/2/L17. id. L17.

- Hayashi, C. (1981) Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula. Progress of Theoretical Physics Supplement, 70, 35–53.
- Herbst, E. and van Dishoeck, E. F. (2009) Complex Organic Interstellar Molecules. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 47, 427–480.
- Hollenbach, D., Johnstone, D., Lizano, S. and Shu, F. (1994) Photoevaporation of disks around massive stars and application to ultracompact H II regions. *The Astrophysical Journal*, **428**, 654–669.
- Holman, M. J., Fabrycky, D. C., Ragozzine, D., Ford, E. B., Steffen, J. H., Welsh, W. F., Lissauer, J. J., Latham, D. W., Marcy, G. W., Walkowicz, L. M., Batalha, N. M., Jenkins, J. M., Rowe, J. F., Cochran, W. D., Fressin, F., Torres, G., Buchhave, L. A., Sasselov, D. D., Borucki, W. J., Koch, D. G., Basri, G., Brown, T. M., Caldwell, D. A., Charbonneau, D., Dunham, E. W., Gautier, T. N., Geary, J. C., Gilliland, R. L., Haas, M. R., Howell, S. B., Ciardi, D. R., Endl, M., Fischer, D., Füresz, G., Hartman, J. D., Isaacson, H., Johnson, J. A., MacQueen, P. J., Moorhead, A. V., Morehead, R. C. and Orosz, J. A. (2010) Kepler-9: A System of Multiple Planets Transiting a Sun-Like Star, Confirmed by Timing Variations. Science, 330, 51–54.
- Honda, M., Inoue, A. K., Fukagawa, M., Oka, A., Nakamoto, T., Ishii, M., Terada, H., Takato, N., Kawakita, H., Okamoto, Y. K., Shibai, H., Tamura, M., Kudo, T. and Itoh, Y. (2009) Detection of Water Ice Grains on the Surface of the Circumstellar Disk Around HD 142527. *The Astrophysical Journal*, **690**, L110–L113.
- Ida, S. and Lin, D. N. C. (2004) Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets. *The Astrophysical Journal*, **604**, 388–413.
- Kaltenegger, L., Segura, A. and Mohanty, S. (2011) Model Spectra of the First Potentially Habitable Super-Earth-Gl581d. *The Astrophysical Journal*, **733**, id. 35.
- Kenyon, S. J., Hartmann, L. W., Strom, K. M. and Strom, S. E. (1990) An IRAS survey of the Taurus-Auriga molecular cloud. Astronomical Journal, 99, 869–887.
- Kokubo, E. and Ida, S. (2002) Formation of Protoplanet Systems and Diversity of Planetary Systems. *The Astrophysical Journal*, 581, 666–680.
- Latham, D. W., Rowe, J. F., Quinn, S. N., Batalha, N. M.,

Borucki, W. J., Brown, T. M., Bryson, S. T., Buchhave, L.
A., Caldwell, D. A., Carter, J. A., Christiansen, J. L.,
Ciardi, D. R., Cochran, W. D., Dunham E. W., Fabrycky,
D. C., Ford, E. B., Gautier, T. N. III., Gilliland, R. L.,
Holman, M. J., Howell, S. B., Ibrahim, K. A., Isaacson,
H., Jenkins, J. M., Koch, D. G., Lissauer, J. J., Marcy, G
W., Quintana, E. V., Ragozzine, D., Sasselov, D., Shporer,
A., Steffen, J. H., Welsh, W. F. and Wohler, B. (2011) A
First Comparison of Kepler Planet Candidates in Single
and Multiple Systems. *The Astrophysical Journal*, **732**,
id. L24.

- Lisse, C. M., Chen, C. H., Wyatt, M. C., Morlok, A., Song, I., Bryden, G. and Sheehan, P. (2009) Abundant Circumstellar Silica Dust and SiO Gas Created by a Giant Hypervelocity Collision in the ~12 Myr HD 172555 System. The Astrophysical Journal, **701**, 2019–2032.
- Lommen, D. J. P., van Dishoeck, E. F., Wright, C. M., Maddison, S. T., Min, M., Wilner, D. J., Salter, D. M., van Langevelde, H. J., Bourke, T. L., van der Burg, R. F. J. and Blake, G. A. (2010) Grain growth across protoplanetary discs: 10 μm silicate feature versus millimetre slope. Astronomy and Astrophysics, 515, id. A77.
- Lynden-Bell, D. and Pringle, J. E. (1974) The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 168, 603–637.
- Lovis, C. and Fischer, D. (2010) Radial velocities. In: *Exoplanets* (ed. S. Seager), the Space Science Series of the University of Arizona Press, Tucson, AZ, 27.
- Mamajek, E. E. (2009) Initial Conditions of Planet Formation: Lifetimes of Primordial Disks. American Institute of Physics Conference Series, 1158, 3–10.
- Mannings, V., Koerner, D. W. and Sargent, A. I. (1997) A rotating disk of gas and dust around a young counterpart to  $\beta$  Pictoris. *Nature*, **388**, 555–557.
- Marois, C., Macintosh, B., Barmen, T., Zuckerman, B., Song, I., Patience, J., Lafrenière, D. and Doyon, R. (2008) Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. Science, **322**, 1348–1352.
- McCaughrean, M. J. and O'dell, C. R. (1996) Direct Imaging of Circumstellar Disks in the Orion Nebula. Astronomical Journal, 111, 1977–1986.
- Mizuno, H. (1980) Formation of the Giant Planets. Progress of Theoretical Physics, 64, 544–557.
- Mordasini, C., Alibert, Y., Benz, W. and Naef, D. (2009) Extrasolar planet population synthesis. II. Statistical comparison with observations. Astronomy and Astrophysics, 501, 1161–1184.
- Mundt, R. and Fried, J. W. (1983) Jets from young stars. The Astrophysical Journal, 274, L83-L86.
- Narita, N., Sato, B., Hirano, T. and Tamura, M. (2009) First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b. Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, L35-L40.

- Nomura, H. (2002) Structure and Instabilities of an Irradiated Viscous Protoplanetary Disk. The Astrophysical Journal, 567, 587–595.
- Palla, F. and Stahler, S. W. (1999) Star formation in the Orion Nebula cluster. The Astrophysical Journal, 525, 772–783.
- Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., Podolak, M. and Greenzweig, Y. (1996) Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. *Icarus*, **124**, 62–85.
- Rucinski, S. M. (1985) IRAS observations of T Tauri and post-T Tauri stars. Astronomical Journal, 90, 2321–2330.
- Sato, B., Kambe, E., Takeda, Y., Izumiura, H., Masuda, S. and Ando, H. (2005) Radial-velocity variability of G-type giants: First three years of the Okayama Planet Search Program. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 57, 97–107.
- Seager, S. and Deming, D. (2010) Exoplanet Atmospheres. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 48, 631– 672.
- Silverstone, M. D., Meyer, M. R., Mamajek, E. E., Hines, D. C., Hillenbrand, L. A., Najita, J., Pascucci, I., Bouwman, J., Kim, J. S., Carpenter, J. M., Stauffer, J. R., Backman, D. E., Moro-Martin, A., Henning, T., Wolf, S., Brooke, T. Y. and Padgett, D. L. (2006) Formation and evolution of planetary systems (FEPS): Primordial warm dust evolution from 3 to 30 Myr around sun-like stars. *The Astrophysical Journal*, 639, 1138–1146.
- Simon, M., Dutrey, A. and Guilloteau, S. (2000) Dynamical masses of T Tauri stars and calibration of pre-mainsequence evolution. *The Astrophysical Journal*, 545, 1034–1043.
- Stapelfeldt, K. R., Krist, J. E., Menard, F., Bouvier, J., Padgett, D. L. and Burrows, C. J. (1998) An edge-on circumstellar disk in the young binary system HK Tauri. *The Astrophysical Journal*, **502**, L65–L69.
- Strom, K. M., Newton, G., Strom, S. E., Seaman, R. L., Carrasco, L., Cruz-Gonzalez, I., Serrano, A. and Grasdalen, G. L. (1989) A study of the stellar population in the LYNDS 1641 dark cloud. I - The IRAS catalog sources. Astrophysical Journal Supplement Series, 71, 183-217.
- Sumi, T., Bennett, D. P., Bond, I. A., Udalski, A., Batista, V., Dominik, M., Fouqué, P., Kubas, D., Gould, A., Macintosh, B., Cook, K., Dong, S., Skuljan, L., Cassan, A., Abe, F., Botzler, C. S., Fukui, A., Furusawa, K., Hearnshaw, J. B., Itow, Y., Kamiya, K., Kilmartin, P. M., Korpela, A., Lin, W., Ling, C. H., Masuda, K., Matsubara, Y., Miyake, N., Muraki, Y., Nagaya, M., Nagayama, T., Ohnishi, K., Okumura, T., Perrott, Y. C., Rattenbury, N., Saito, To., Sako, T., Sullivan, D. J., Sweatman, W. L., Tristram, P. J., Yock, P. C. M., The MOA Collaboration, Beaulieu, J. P., Cole, A., Coutures, Ch., Duran, M. F., Greenhill, J., Jablonski, F., Marboeuf, U., Martioli, E.,

Pedretti, E., Pejcha, O., Rojo, P., Albrow, M. D., Brillant, S., Bode, M., Bramich, D. M., Burgdorf, M. J., Caldwell, J. A. R., Calitz, H., Corrales, E., Dieters, S., Dominis Prester, D., Donatowicz, J., Hill, K., Hoffman, M., Horne, K., Jorgensen, U. G., Kains, N., Kane, S., Marquette, J. B., Martin, R., Meintjes, P., Menzies, J., Pollard, K. R., Sahu, K. C., Snodgrass, C., Steele, I., Street, R., Tsapras, Y., Wambsganss, J., Williams, A., Zub, M., The PLANET Collaboration, Szymański, M. K., Kubiak, M., Pietrzyński, G., Soszyński, I., Szewczyk, O., Wyrzykowski, L., Ulaczyk, K., The OGLE Collaboration, Allen, W., Christie, G. W., DePoy, D. L., Gaudi, B. S., Han, C., Janczak, J., Lee, C. -U., McCormick, J., Mallia, F., Monard, B., Natusch, T., Park, B. -G., Pogge, R. W., Santallo, R. and The  $\mu$ FUN Collaboration (2010) A Cold Neptune-Mass Planet OGLE-2007-BLG-368 Lb: Cold Neptunes are common. The Astrophysical Journal, 710,

1641 - 1653.

- Swain, M. R., Vasisht, G. and Tinetti, G. (2008) The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet. *Nature*, 452, 329–331.
- Terebey, S., Shu, F. H. and Cassen, P. (1984) The collapse of the cores of slowly rotating isothermal clouds. *The Astrophysical Journal*, 286, 529–551.
- Weidenschilling, S. J. (1977) The distribution of mass in the planetary system and solar nebula. Astrophysics and Space Science, 51, 153–158.
- Wilking, B. A., Lada, C. J. and Young, E. T. (1989) IRAS observations of the Rho Ophiuchi infrared cluster - Spectral energy distributions and luminosity function. *The Astrophysical Journal*, **340**, 823–852.
- Winn, J. N. (2010) In: *Exoplanets* (ed. S. Seager), the Space Science Series of the University of Arizona Press, Tucson, AZ, 55.